

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung



**10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik
KT2012 | Residenzschloss Dresden | 14.–15. Juni 2012**

Stelzer · Grote · Brökel · Rieg · Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik KT2012

Ralph Stelzer · Karl-Heinrich Grote · Klaus Brökel
Frank Rieg · Jörg Feldhusen (Hrsg.)

ENTWERFEN ENTWICKELN ERLEBEN

Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung

Entwickeln – Entwerfen – Erleben.
Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung
10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2012)

Herausgeber:

Prof. Dr. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden)
Prof. Dr. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)
Prof. Dr. Klaus Brökel (Universität Rostock)
Prof. Dr. Frank Rieg (Universität Bayreuth)
Prof. Dr. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen)

Wir bedanken uns für die Unterstützung bei
ma design, Tedata, Continental, xPLM, B.I.M. Consulting und Reiss Büromöbel

ma design
//ENGINEERING

Continental 

B.I.M.
consulting

TEDATA

xPLM
Solution

REISS

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 987-3-942710-80-0

© 2012 TUDpress
Verlag der Wissenschaften GmbH
Bergstr. 70 | D-01069 Dresden
Tel.: 0351/47 96 97 20 | Fax: 0351/47 96 08 19
<http://www.tudpress.de>

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Layout und Satz: Sandra Olbrich/Technische Universität Dresden.
Umschlaggestaltung: TU Dresden, Illustration Audi A6 Limousine © 2012 Audi AG

Analyse des monetären und qualitativen Nutzens schwimmender Energiekonverter

Technische Neu- und Weiterentwicklungen sowie eine Änderung der Marktverhältnisse sind maßgebliche Motive für Investitionen. Im Bereich der Kleinwasserkraft sind Investitionen – quantitativ betrachtet – bedingt durch die aktuelle Konjunkturlaute nach der Finanzkrise gesunken. Auf der anderen Seite setzt die Politik verstärkt auf die Nutzung erneuerbarer Energien, um das Konzept der Nachhaltigkeit auf diesem Gebiet zu forcieren.

A Einleitung

Die Nutzung der Energie freier Strömungen ist seit Menschengedenken von großem Interesse. Schöpfräder und Schiffsmühlen, als Wasserräder zur Wasserverteilung und für Mahlvorgänge eingesetzt, haben ihr technisches Niveau im 19. Jahrhundert erreicht. In der heutigen Zeit erleben Wasserräder ihr Comeback, da sie Teil von Forschungsprojekten und eine Neuaufgabe wert sind.

Für die Beschleunigung der Entwicklung neuer oder neu aufgelegter Technologien zur Nutzung der Energie aus Wasser werden seit Jahren im Rahmen verschiedener Förderprogramme öffentliche Gelder zur Verfügung gestellt. Mit dem EU-Projekt *HYLOW* (Akronym für Hydropower converter for very low head differences) ist unter anderem die Entwicklung und Herstellung von Kleinwasserkraftanlagen mit integrierten Wasserrädern unterstützt worden.

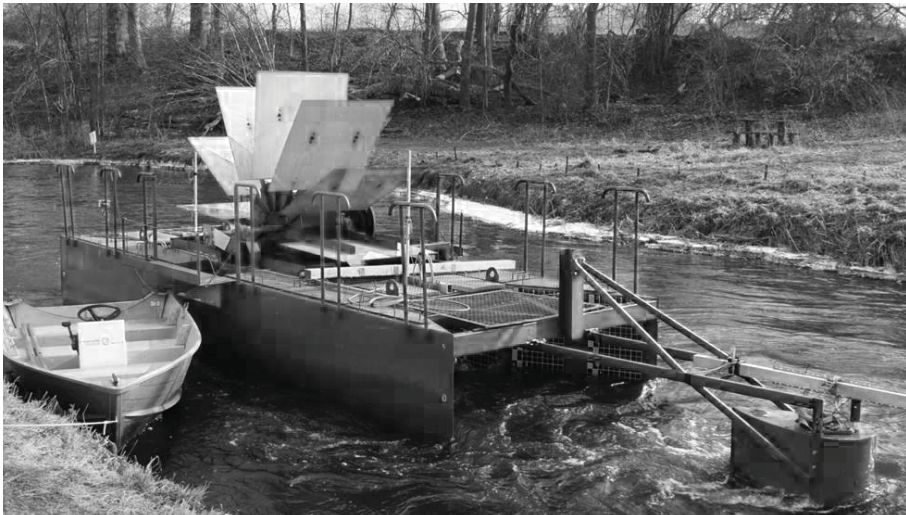
B *HYLOW* und seine Ergebnisse

Das Projekt *HYLOW* erstreckte sich über fast vier Jahre und bediente in dieser Zeit drei Forschungsfelder, die sich mit Kleinwasserkraft beschäftigten: Mikroturbinen in Versorgungsleitungen, installierte Staudruckräder in Flusswehren und freischwimmende Energiewandler (Free Stream Energy Converter – FSEC). Letztere sind Gegenstand dieser Ausführungen.

B.1 Das Großmodell des FSEC

Der FSEC überzeugt mit seiner Größe – 7.500 mm in der Länge, 2.400 mm in der Breite und mit dem Wasserrad etwa 3.300 mm in der Höhe – und mit seinem robusten Stahlkörper. Abbildung 1 zeigt das Modell in einem seiner Einsatzgebiete, einem Flora-Fauna-Habitat in Norddeutschland. Fast zwei Monate lang ist es dort getestet worden. Neben Fließgeschwindigkeiten und Leistungswerten wurden auch Wasserstände und Geräuschpegel gemessen, um einen Eindruck von den Auswirkungen auf die Umwelt zu gewinnen (Hadler et al. 2011). Technische und ökologische Beobachtungen und Ergebnisse sind in Berichten und Veröffentlichungen ausgewertet worden (siehe auch: www.hy-low.eu).

Abbildung 1: Das Testmodell des FSEC im Einsatzgebiet



Jedoch ist der FSEC auf Grund seiner geringen Leistungswerte nicht marktfähig. Das Versuchsmodell ist ein Prototyp, an dem zahlreiche Umbauten und Änderungen vorgenommen wurden, und der rein kostentechnisch für den Markt nicht interessant sein kann. Gefordert ist eine Lösung, die ökologisch unbedenklich, technisch ausgereift und kostentechnisch attraktiv ist. Doch zunächst sollen die technischen Ergebnisse betrachtet werden.

B.2 Qualitative Ergebnisse der Versuche

Das große Modell hätte nicht in dieser Form getestet werden können, wären diesem Großversuch nicht zahlreiche kleinmaßstäbliche Versuche voraus gegangen. Die Grobgeometrie ist vorgegeben – zwei Schwimmkörper, die die Kulisse bilden, sind über eine Bodenplatte miteinander verbunden. In verschiedenen europäischen Strömungsrinnen in Laboren und schnellfließenden Bächen in der Natur sind in Bauart, Größe und Material unterschiedliche kleine Modelle getestet worden. Der qualitative Extrakt aller Versuche ist nachfolgend aufgelistet (Hylow 2012):

- Der Strömungszulauf ist konvergent mit einem Öffnungswinkel von 120° – 130° .
- Der Strömungsauslauf ist für unidirektional angeströmte Anlagen gerade, für bidirektional angeströmte Anlagen schräg. Die Form des Auslaufs hat keinen signifikanten Einfluss auf die Leistungsmessung.
- Die Positionierung der Wasserradwelle ist mittig und kann für unidirektionale Anlagen auch im hinteren Bereich der Anlage vorgenommen werden.
- Strömungsabrisskanten zur Ablenkung von Turbulenzen und zur Verhinderung von Rückstaus im Auslaufbereich sind unterhalb des Hecks vorteilhaft.
- Eine Spalthöhe (Abstand von der unteren Wasserradschaukel zur Bodenplatte) von 10 %–12 % der Gesamteintauchtiefe trägt zur Leistungserhöhung bei.
- Pro 0,25 m/s Fließgeschwindigkeit sollte sich die unidirektional angeströmte Anlage um 1° bis $1,5^{\circ}$ heckseitig neigen. Die erforderliche Ballastierung kann innerhalb der Schwimmkörper reguliert werden.

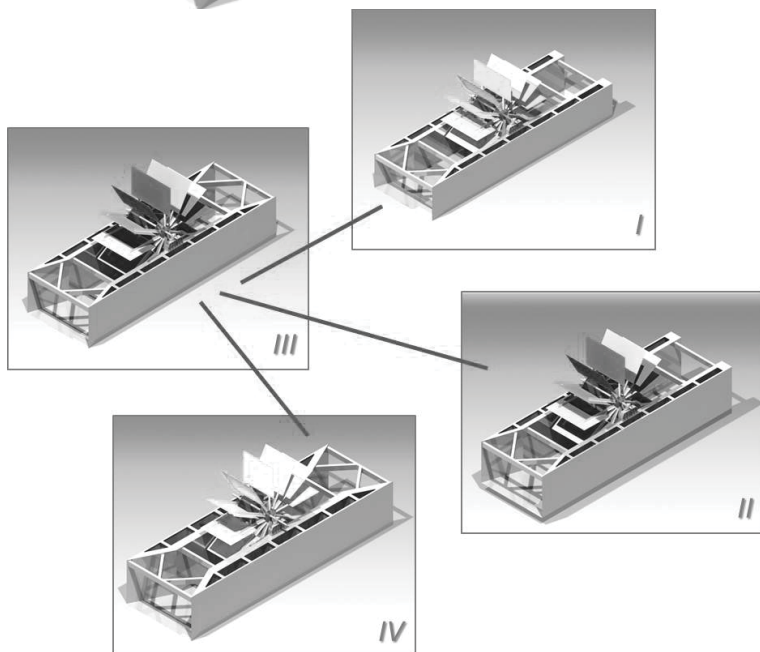
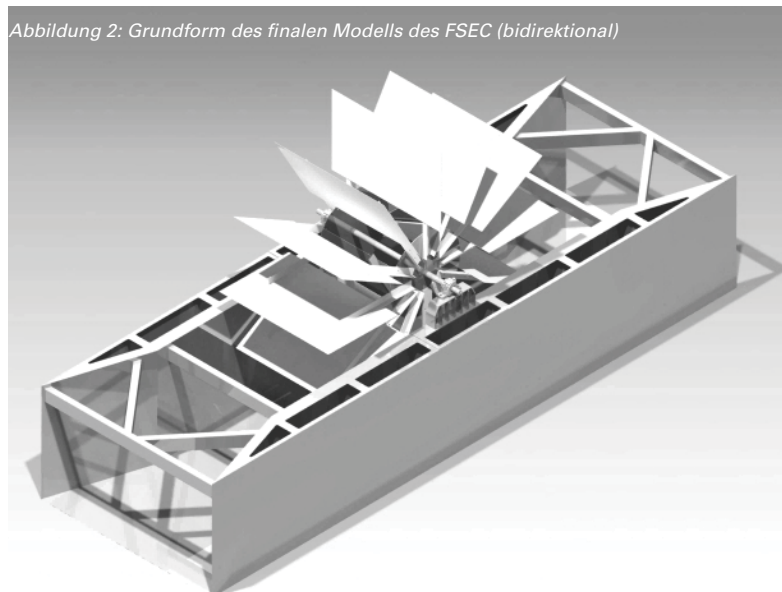


Abbildung 3: Abgeleitete Varianten aus der Grundform des FSEC

Die finale Variante des FSEC hat eine doppelsymmetrische Grundform, wie nachfolgende Abbildung 2 zeigt.

C Ableitung von vier Modellvarianten

Aus der oben beschriebenen Grundform des FSEC leiten sich weitere drei Varianten für unterschiedliche Einsatzgebiete ab. Die erste Variante verfügt über eine gerade Heckform und ist somit nur unidirektional anzuströmen. Mit ihrer niedrigen Pontonhöhe ist sie besonders gut für flache Gewässer mit mäßigen Fließgeschwindigkeiten geeignet. Die zweite Variante gleicht der ersten hinsichtlich ihres geraden Hecks, jedoch sind die Pontons höher, womit sie für den Einsatz in stärkeren Strömungen angelegt ist. Durch die höheren Pontons können auch längere Schaufelblätter realisiert werden. (Abbildung 3, rechts)

Die dritte Variante stellt die Grundform selbst dar; sie ist bidirektional ausgeführt. Die Symmetrie ist in Längs- und Querrichtung hergestellt, was diese Variante für den Einsatz in Tidegebieten prädestiniert. Die letzte, in Abbildung 3 unten links dargestellte Variante ist von allen die am meisten robuste – ihre Schwimmkörper sind sehr breit angelegt. Die gesamte Anlage ist für Fließgeschwindigkeiten bis zu 3 m/s ausgelegt und kommt an strömungsintensiven und -turbulenten Stellen zum Einsatz.

D Investitionsrechnungen und Vorteilsnachweis

D.1 Amortisation

Im Allgemeinen sind schwimmende Energiekonverter in ihrer Anschaffung teuer. Nachgefertigte Einzelstücke des FSEC gehen auf ein Angebotsspektrum von 30.000 € bis über 46.000 € (pro Anlage) zurück. Unter gleichen Rahmenbedingungen fällt die Wahl auf das Angebot mit dem günstigsten Kaufpreis. Wird die Anschaffung der Anlage finanziert, addieren sich zu den jährlichen Wartungs-, Service- und Instandhaltungskosten noch die Kosten für die Kredittilgung.

Im Folgenden wird das günstigste Angebot anhand der Kapitalwertmethode, einer Methode der dynamischen Investitionsrechnung, bewertet.

„Der Kapitalwert K_0 ergibt sich aus dem Barwert aller einem Investitionsvorhaben zurechenbaren Einzahlungen E_t und Auszahlungen A_t .“

(Wöhe et al. 2010)

Zusammen mit dem Kalkulationszinsfuß i und einer Investitionsdauer n entsteht: Aus den Ergebnissen lässt sich folgendes ableiten (Wöhe et al. 2010):

$$K_0 = \sum_{t=0}^n (E_t - A_t) * (1 + i)^{-t}$$

- $K_0 > 0$: Die Investition amortisiert sich im Zeitraum der Nutzungsdauer und das eingesetzte Kapital fließt mit Gewinn an den Investor zurück.
- $K_0 = 0$: Die Investition amortisiert sich am Ende der Nutzungsdauer und das eingesetzte Kapital fließt an den Investor zurück.
- $K_0 < 0$: Die Investition amortisiert sich nicht. Aus rein wirtschaftlicher Sicht ist von einer Investition abzuraten.

In Tabelle 1 wird über die Nutzungsdauer von 20 Jahren die Entwicklung des Kapitalwertes dargestellt. A_0 ist in diesem Fall der Anschaffungswert und i als Abzinsungszinssatz wird mit 5,22% angegeben. Die Auszahlungen A_t setzen sich aus Kosten für die Gewässerpacht, Wartung und Instandhaltung sowie Servicekosten (Versicherung, Steuern, Verwaltung) zusammen. Et sind jene Vergütungen, die für die Stromeinspeisung in das öffentliche Netz gezahlt werden. Für Deutschland beläuft sich die Einspeisevergütung auf 0,1267 € pro Kilowattstunde. Um in der 20-jährigen Nutzungsdauer eine Amortisation der Anlage zu erreichen, müssen kontinuierlich 3,2 kW an Leistung erzeugt werden. Dieses ist in Regionen mit Fließgeschwindigkeiten zwischen 2,5 und 3,5 m/s und einer doppeltbreiten Variante des FSEC möglich. Allerdings wäre dann der Anschaffungspreis ein anderer und die Rechnung ginge noch nicht auf.

| t [Jahr] | 0 | 1 | 2 | ... | 19 | 20 |
|--------------|---------|-------------|-------------|-----|-----------|-----------|
| A_0 [€] | 30 000 | – | – | ... | – | – |
| E_t [€] | | 3 329,68 | 3 329,68 | ... | 3 329,68 | 3 329,68 |
| A_t [€] | | 1 040,00 | 1 040,00 | ... | 1 040,00 | 1 040,00 |
| i | | 5,22% | 5,22% | ... | 5,22% | 5,22% |
| Σ [€] | | 2 387,50 | 4 656,99 | ... | 29 865,40 | 30 776,66 |
| K_0 [€] | -30 000 | - 27 612,50 | - 25 343,01 | ... | - 134,60 | 776,66 |

Tabelle 1: Berechnungen zum Kapitalwertverlauf

Der Kapitalwertverlauf für die Kleinwasserkraftanlage mit dem Anschaffungswert von 30.000 € ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Kapitalwertkurve schneidet kurz vor dem Ende der Nutzungsdauer die Nulllinie und bleibt im positiven Bereich. Wird nach dem 20. Jahr die Zahlung der Einspeisevergütung eingestellt, und ist die Anlage komplett bezahlt, kann weiter, sofern sie noch Nutzungsvorrat enthält, für den Eigenbedarf Strom erzeugt werden. Diesem steht der aktuell durchschnittliche Strompreis von etwa 0,25 €/ kWh gegenüber.

D.2 Vorteilsnachweis der Investition

Im Vorfeld von Investitionsentscheidungen ist es naheliegend, dynamische Amortisationsrechnungen unter verschiedenen Bedingungen anzustellen und diese durch entsprechend auszuwählende Rentabilitätskennzahlen des Investitionsobjektes zu ergänzen. Dabei ist natürlich auch die sogenannte Alternativinvestition zu beachten, deren grundsätzliche und einfachste Variante stets das Unterbleiben der Investition ist. Das könnte besonders interessant für den Vorteilsnachweis beim Bau von Kleinwasserkraftanlagen in erwähnten entlegenen Regionen sein.

Der qualitative Nutzen einer Anlage kann unabhängig vom monetären Nutzen derselben das ausschlaggebende Kriterium für die Investition sein. Bei Investitionen in Kleinwasserkraft muss ein entscheidender Aspekt ergänzt werden: Entscheidungen werden für

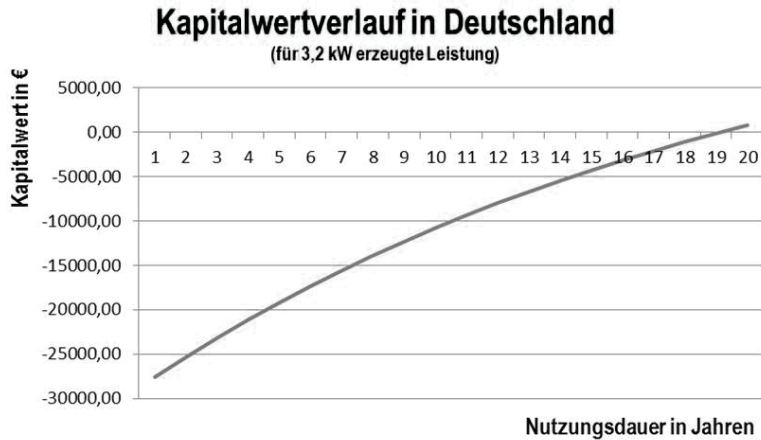


Abbildung 4: Graphische Darstellung des Kapitalwertverlaufs

einen langen Zeitraum getroffen. Die Amortisationszeiten sind oft unüberschaubar lang und die einflussnehmenden Randbedingungen kaum kalkulierbar. Für hochindustrialisierte Regionen, in denen Strom zu Tag- und Nachtzeiten zur Verfügung steht, sind Kleinwasserkraftanlagen im beschriebenen Leistungsbereich entbehrlich. In entlegenen Regionen, in denen Forschungsstationen, Wohnhäuser oder Versorgungszentren jedweder Art an kein Stromnetz angeschlossen sind, könnten solche Kleinwasserkraftanlagen bei vorhandenen nutzbaren Fließgewässern eine bedeutende Rolle spielen. Genutzt werden können sie in jedem Fall auch, wenn Energieengpässe bestehender Stromnetze überbrückt werden sollen.

E Ausblick

Das Projekt *HYLOW* ist in seiner vierjährigen Forschungszeit an Grenzen bezüglich der Untersuchungen zur Nutzung der Kleinwasserkraft gestoßen. Das großmaßstäbliche Modell (Abbildung 1) ist zwar in einem Flora-Fauna-Habitat ausgiebig getestet worden. Allerdings beschränkten sich die Untersuchungen auf einen recht kurzen Zeitraum und auf ein Gebiet mit eher mäßigen Fließgeschwindigkeiten. Das Erforschen des Verhaltens der Versuchsanlage in einem

Tidegebiet mit wechselnden Strömungsrichtungen und differenten Geschwindigkeiten ist ausgeblieben. Gleichwohl ist in den Untersuchungen weiteres Entwicklungspotential erkannt worden: Wasserräder gehören nicht zum alten Eisen. Die Technologie, die in dieser robusten Anlage steckt, ist ausbaufähig. Mit breiten Schaufeln, optimierten Schwimmkörpern und einer durchdachten Lastabnahme können diese Kleinwasserkraftanlagen durchaus den Markt erobern. Denn die Aspekte der Mobilität, der schadstofffreien Stromerzeugung in entlegenen bzw. infrastrukturell schwach erschlossenen Regionen oder aber die mögliche Inanspruchnahme der Einspeisevergütung sind nicht von der Hand zu weisen und erhöhen sowohl den monetären als auch den qualitativen Nutzen einer Investition.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungstätigkeiten durch die Europäische Kommission im 7. Rahmenprogramm, Vertragsnummer 212423.

Literaturverzeichnis

- Hadler, J. & Brökel, K. (2011): Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit mobiler Energiewandler, 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Aachen: Shaker Verlag, 336-342
- Hylow, 2012: Design Guide, Free Stream Energy Converter, Datum der Veröffentlichung: 2012
- Wöhe, G. & Döring, U. (2010): Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, München: Verlag Franz Vahlen

Kontakt

Dipl. Wi.-Ing. Jana Hadler
 Prof. Dr.-Ing. Klaus Brökel
 Universität Rostock
 Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD
 Albert-Einstein-Straße 2
 18059 Rostock
<http://www.kt.uni-rostock.de/ktc>

